第46卷 第5期
2023年5月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 5
May 2023

黄河流域城市生态福利绩效测算及驱动因素研究

董洁芳[1]， 张凯莉[2]， 屈学书[1]， 阮 征[3]

（1. 运城学院黄河文化生态研究院/文化旅游系，山西 运城 044000；2. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127；3. 陕西省地质科技中心，陕西 西安 710065）

摘 要：生态福利绩效（EWP）的提升是生态文明建设的必然选择，对区域可持续发展具有重要意义。从生态福利视角出发，构建指标体系，基于面板数据，采用非期望产出超效率SBM模型对2006—2019年黄河流域59个地级城市EWP进行测算，运用空间探索方法和时空地理加权回归（GTWR）模型对流域EWP的空间分布特征及驱动因素进行解析。结果表明：（1）黄河流域城市EWP值普遍较低，平均存在19.7%的提升空间。（2）黄河流域城市EWP存在显著正向空间自相关，“热点”高-高型城市主要分布在人口密度较低的上游地区；“冷点”低-低型多为黄河中下游经济发展较快、人口相对集中的城市。（3）降水量、教育发展水平和产业结构水平对城市EWP的提升具有显著促进作用；人口密度、经济强度及金融发展水平对城市EWP的改善具有明显抑制作用。其中，降水量、教育发展水平和人口密度对城市EWP的边际效应较大。研究结果弥补了EWP影响因子“时-空”非平稳性分析的不足，可为有关部门制定城市EWP政策提供参考依据。

关 键 词：生态福利绩效；SBM模型；遥感数据；GTWR模型；黄河流域

文章编号：1000-6060(2023)05-0834-12(0834~0845)

伴随着城镇化快速发展，全球性和区域性的生态危机日趋严重，威胁人类福祉，阻碍城市可持续发展。城市发展目标应更加关注人类福祉的提升，即以更少的环境污染、资源消耗实现经济的健康发展[1]。生态福利绩效（EWP）是指单位自然消耗所带来的福祉水平提升，是单位生态消耗的福利产出效率。提高城市EWP是实现城市可持续发展的有效抓手之一[2]。科学评价城市EWP并探究其作用机制对实现城市生态保护与社会经济协调发展具有重要意义，目前已成为城市低碳发展中亟待解决的科学问题[3]。

国内外学者对EWP的概念和内涵进行了深入持续的探究。1974年Daly[3]首次提出EWP概念及比值的测算方法，受到了学者们广泛关注。Daly认为EWP是社会福利价值量和生态资源消耗的实物量比值，反映单位资源投入所带来的社会福利提高程度。但由于比值中社会福利价值量在实践中难以量化和对比，所以EWP的概念一直无法广泛应用[1]。1990年，联合国“千年生态系统评估”报告[4]对人类福祉的概念进行了界定，发布了“人类发展指数”。人类发展指数是一个综合指数，从3个维度衡量一个国家的平均发展水平：卫生和医疗水平、受教育水平和收入水平。这一指数既包括基于国民所得的经济福利，又包括了基于社会选择的非经济福利。这种有限变量的做法便于计算和分析，从而使EWP评价有了可靠的计量依据。2012年，里约+20会议指出EWP可以通过生态投入与社会福利的脱钩程度来反映，在此基础上，EWP研究得到

收稿日期：2022-08-03； **修订日期**：2022-09-11
基金项目：国家社会科学基金项目（18BJY120）；山西省社科联重点课题（SSKLZDKT2022147）；山西省黄河文化生态研究院项目（HH202101）；运城学院旅游管理重点学科（XK-2021031）资助
作者简介：董洁芳（1984-），女，博士，副教授，主要从事区域经济与生态旅游开发研究. E-mail: dongjiefang-2005@163.com
通讯作者：张凯莉（1993-），女，博士，主要从事生态规划和生态系统评估等方面的研究. E-mail: 202010238@stumail.nwu.edu.cn

进一步发展。综合而言,EWP是建立福利的价值量和生态资源消耗的实物量的比值关系,通过对其进行时序分析可以反映社会福利与生态资源消耗的脱钩程度,进而反映一个国家或地区将自然资本消耗转化为福祉的能力。

目前,基于EWP研究成果主要包含以下3个方面:一是评价EWP的指标与方法。EWP测度指标从以GDP为主逐渐演变为人类发展综合指数,EWP的评价指标逐渐完善[5-8]。EWP的测度方法从研究初期的社会福利与生态足迹比值的简单方法[9-12],到近年来的随机前沿(SFA)、包络分析(DEA)方法[13-15],以及基于松弛变量的超效率DEA模型,使得EWP测算精度越来越高[5]。如龙亮军[14]基于DEA方法构建城市EWP评价指标体系,并测算了中国35个主要城市2011—2015年的EWP。但现有评价指标多以经济因素为主,对于生态环境因素考虑不足。二是评价EWP的尺度以国家和省际为主。Jorgenson等[16]研究了1970—2010年106个国家的经济发展对人类福祉的影响;方时姣等[17]研究了中国2005—2016年30个省份EWP水平及其空间效应;徐昱东等[10]同样对中国30个省份EWP进行研究。但在城市尺度方面,研究成果相对缺乏。仅有龙亮军等[18]利用超效率DEA模型对上海市EWP水平进行综合测评,具体到黄河流域城市尺度的研究鲜见。三是探究EWP的驱动机制。多数研究只刻画EWP的时空变化特征和分异格局[10,19-20]等,仅有少数成果开展了影响因素[1,12,21]、空间收敛性[22]的研究。如李成宇等[1]运用空间自相关方法和空间误差模型对中国省际EWP的空间分布特征及影响因素进行检验。冯吉芳等[12]采用对数平均迪氏分解法(LMDI)剖析省市EWP的影响因素。陈少炜等[23]使用空间计量模型对黄河流域9个省份EWP的影响因素进行检验。但已有文献未充分考虑各因子对EWP影响的空间非均质性和时间滞后效应。

鉴于此,本文尝试做以下3个方面拓展:(1)利用人类发展指数表征城市社会福利水平,综合考虑生态资源投入,构建多产出目标的城市EWP评价指标体系;(2)将非期望产出纳入超效率SBM模型,测算黄河流域59个城市EWP;(3)基于2006—2019年面板数据,运用时空地理加权回归(GTWR)模型,分析EWP影响因子的时空异质性。

1 研究区概况

黄河发源于青藏高原,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区,流域面积达75×10^4 km^2,是我国重要生态功能区和经济地带[24]。由于气候变化和人类活动的影响,黄河流域生态系统退化[25]、水源涵养功能下降、水土流失严重、生态流量偏低[26]等环境问题日益凸显。城市作为经济发展和生态治理保护的载体,是促进流域绿色协调发展的核心推动力[27]。因此,本文将地级城市作为研究单元,探索城市生态保护与高质量发展协调推进路径。借鉴已有文献[24,26],结合黄河水利委员会公布的流域范围,综合考虑数据可得性,最终选取59个地级及以上城市(图1)为研究对象。

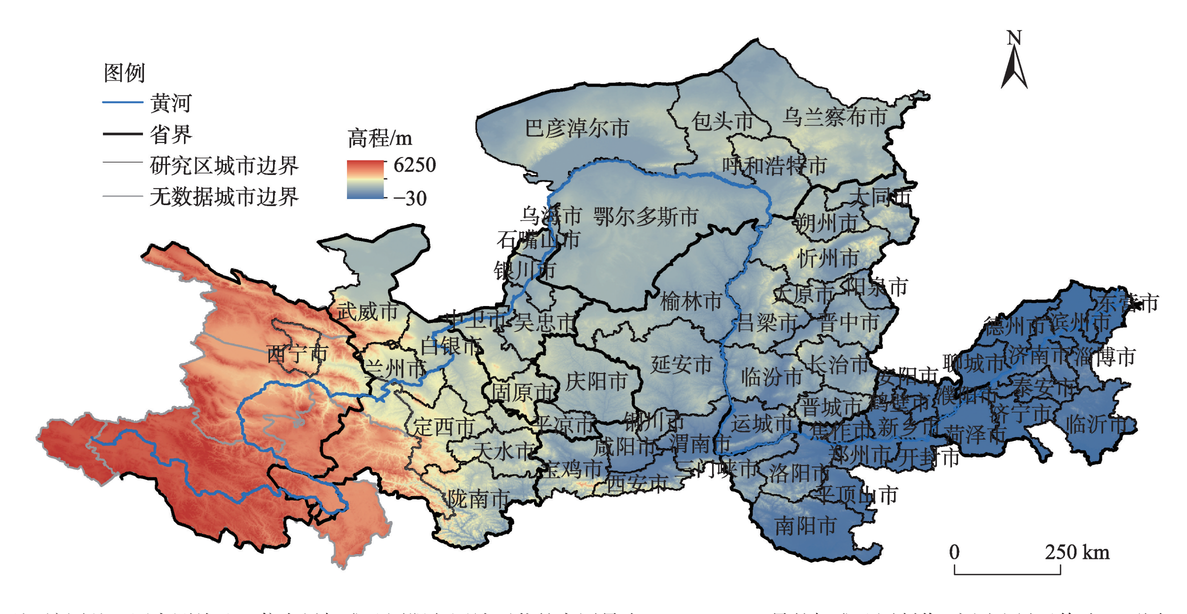
2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

$PM_{2.5}$数据来源于达尔豪斯大学大气成分分析组(Atmospheric Composition Analysis Group at Dalhousie University)(数据编号V4.GL.02);生境质量年均值数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn);其余数据均来自2007—2020年《中国城市统计年鉴》、水资源公报等,缺失数据利用内插法和外推法得出。以研究区地图数据为基础,利用ArcGIS 10.8软件对遥感栅格原始数据进行投影、裁剪和分区统计等操作[28],构建包含统计年鉴和遥感影像数据的多源数据集。

2.2 城市EWP测度方法

2.2.1 测算指标选取 参考已有文献[29-30],综合科学性、系统性与可操作的原则,构建指标体系准则层,基于数据可获得性确定指标变量。(1)准则层的构建。投入准则层包含资源型投入与非资源型投入。资源型投入以能源、水资源、土地资源为主,非资源型投入主要包含资本、劳动力。产出准则层通常分为期望产出和非期望产出。期望产出主要包含经济、教育和健康3个维度,非期望产出则为废水、废气、废渣等。(2)指标变量的确定。按照准则层的含义,确定具体指标。其中,投入指标包含5项,产出指标包含9项。综上,城市EWP测算指标



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

体系如表1所示。

2.2.2　超效率SBM-DEA模型　为了对处于前沿面的决策单元进一步对比评价，参考已有文献[31]，本文选取基于非径向非角度的产出导向超效率SBM模型，对黄河流域59个城市EWP进行测度。假设有n个决策单元的生产系统，每个决策单元由投入、期望产出和非期望产出3个投入产出向量构成，使用m单位投入产生r_1的期望产出和r_2的非期望产出，模型[32]构建为：

$$\rho^{*}=\min\frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{r_1+r_2}\left(\sum_{s=1}^{r_1}\bar{y}^{d}/y_{sk}^{d}+\sum_{q=1}^{r_2}\bar{y}^{u}/y_{qk}^{u}\right)} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\bar{x}\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}x_{ij}\lambda_j,\ \bar{y}^{d}\leqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y_{sj}^{d}\lambda_j,\ \bar{y}^{u}\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y_{qj}^{u}\lambda_j\\ \bar{x}\geqslant x_k,\ \bar{y}^{d}\leqslant y_k^{d},\ \bar{y}^{u}\geqslant y_k^{u}\\ \lambda_j\geqslant 0,\ i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n;\ j\neq 0\\ s=1,2,\cdots,r_1;\ q=1,2,\cdots,r_2\end{cases} \tag{2}$$

式中：ρ^{*}为目标效率值；x_{ik}和x_{ij}分别为第k个和第j个决策单元的第i项输入；y_{sk}^{d}和y_{sj}^{d}分别为第k个和第j个决策单元的第s项期望产出；y_{qk}^{u}和y_{qj}^{u}分别为第k个和第j个决策单元的第q项非期望产出；向量$\bar{x}$、$\bar{y}^{d}$和$\bar{y}^{u}$分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛量；λ为权重向量。

表1　城市生态福利绩效（EWP）测算指标体系

Tab. 1　Calculating index system for urban EWP

目标层	准则层	指标变量
投入	资源型投入	能源消费量(标准煤)/t·人$^{-1}$
		城市用水量/t·人$^{-1}$
		人均建成区面积/km^2·(10^4人)$^{-1}$
	非资源型投入	城镇单位从业人员期末数/10^4人
		固定资产投资总额/元·人$^{-1}$
产出	期望产出	人均GDP/10^4元
		万人中小学在校人数/人
		万人医院床位数/张
		生境质量年均值
		人均绿地面积/km^2·人$^{-1}$
	非期望产出	$PM_{2.5}$年均浓度
		工业二氧化硫排放量/t·(10^4人)$^{-1}$
		工业粉尘排放量/t·(10^4人)$^{-1}$
		工业废水排放量/t·(10^4人)$^{-1}$

2.3　城市EWP驱动因素分析方法

2.3.1　驱动因素指标选取　城市EWP受到多种因素共同作用，考虑黄河流域区域特征，本文综合考察自然、社会、经济3类因素对城市EWP的影响。具体代理变量及测度方法如表2所示。

2.3.2　全局空间自相关　构建泰森多边形，采用全局自相关模型探究黄河流域59个城市EWP的空间分布，以判断其在空间上是否存在集聚性。本文采用全局Moran's I指数，计算公式如下：

表2 城市EWP影响因素指标

Tab. 2 Indicators of influencing factors of urban EWP

因素分类	影响因素	测度方法
自然因素	降水量(X_1)/mm	年均降水量
	气温(X_2)/℃	年均气温
社会因素	人口密度(X_3)/km²·人⁻¹	年末户籍人口/行政区域面积
	教育发展水平(X_4)/%	教育事业费支出/GDP
经济因素	经济强度(X_5)/%	固定资产投资/GDP
	对外开放程度(X_6)/%	外商投资工业总产值/GDP
	金融发展水平(X_7)/%	年末金融机构存贷款余额/GDP
	产业结构水平(X_8)/%	第三产业增加值/GDP

$$\text{Moran's } I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2},\ (i\neq j) \quad (3)$$

式中：x_i、x_j 分别为地理单元的EWP；n 为城市单元个数；W_{ij} 为空间权重，采用Rook邻接标准定义；$\bar{x}$ 为所有城市单元EWP的均值。Moran's I 的取值范围在−1和1之间，越接近于1，空间正相关性越强；越接近于−1，空间负相关性越强。统计检验采用 Z 检验和 P 检验。

2.3.3 局域空间自相关 局域空间自相关用来度量局部空间单元相对于整体研究范围空间自相关的影响程度[32]，本文采用局部Moran's I 指数，计算公式如下：

$$\text{Local Moran's } I=\frac{n\left(x_i-\bar{x}\right)\sum_{j=1}^{m}W_{ij}\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2},\ (i\neq j) \quad (4)$$

式中：x_i、x_j 分别为地理单元 i、j 的EWP；$\bar{x}$ 为所有城市单元EWP的平均值；n 为城市单元个数；W_{ij} 为空间权重，采用Rook邻接标准定义；m 为城市单元 i 相邻的多边形个数。

2.3.4 GTWR模型 GTWR模型是一种空间分析技术，其加入了空间和时间维度，既能考察自变量间是否存在空间自相关性[33]，也能解决时间特征问题，为处理"时−空"的非平稳性提供了分析基础，更符合客观实际[34−35]，更有利于探索时空变异特征和空间规律[36]。其模型表示如下：

$$Y_i=\beta_0\left(u_i,v_i,t_i\right)+\sum_k\beta_k\left(u_i,v_i,t_i\right)X_{ik}+\varepsilon_i \quad (5)$$

式中：Y_i 为观测值；u_i 和 v_i 分别为第 i 个观测点的纬度和经度；t_i 为 i 个观测点所处的时序；$\left(u_i,v_i,t_i\right)$ 即为第 i 个观测点的时空坐标；$\beta_0\left(u_i,v_i,t_i\right)$ 为回归常数；$\beta_k\left(u_i,v_i,t_i\right)$ 为第 i 个观测点第 k 个自变量的回归系数；X_{ik} 为第 k 个自变量在第 i 点的值；ε_i 为残差。

GTWR估计的核心是时空权重矩阵与带宽的确定[33]。时空权重矩阵 $\beta_k\left(u_i,v_i,t_i\right)$ 的估计公式如下：

$$\hat{\beta}\left(u_i,v_i,t_i\right)=\left[X^{\mathrm{T}}W\left(u_i,v_i,t_i\right)X\right]^{-1}X^{\mathrm{T}}W\left(u_i,v_i,t_i\right)Y \quad (6)$$

式中：$\hat{\beta}\left(u_i,v_i,t_i\right)$ 为 $\beta_k\left(u_i,v_i,t_i\right)$ 的估计值；$W\left(u_i,v_i,t_i\right)$ 为时空权重矩阵；X 为自变量构成的矩阵；X^{T} 为矩阵的转置；Y 为观测值构成的矩阵。为了避免因数据离散造成"长尾效应"，本文采用bi-square空间权函数[37]：

$$W_{ij}^{ST}=\begin{cases}\left[1-\left(\dfrac{d_{ij}^{ST}}{b_i}\right)^2\right]^2, & d_{ij}^{ST}\leq b_i\\ 0, & d_{ij}^{ST}>b_i\end{cases} \quad (7)$$

式中：W_{ij}^{ST} 为时空权重矩阵；b_i 为带宽，结合研究区实际，本文采用自适应内核类型(Adaptive bandwidth)，确立准则为AICc准则法；d_{ij}^{ST} 为观测点 i 和观测点 j 之间的时空距离，即：

$$d_{ij}^{ST}=\sqrt{\delta\left[\left(u_i-u_j\right)^2+\left(v_i-v_j\right)^2\right]+\mu\left(t_i-t_j\right)^2} \quad (8)$$

式中：u_i、v_i、t_i 分别为第 i 个观测点的纬度、经度、观测点所处的时序；u_j、v_j、t_j 为 j 个观测点的纬度、经度、观测点所处的时序；δ 为空间带宽参数与时空带宽参数的比值；μ 为时间带宽参数与时空带宽参数的比值。

3 结果与分析

3.1 城市EWP测度结果

选择超效率SBM模型对黄河流域59个城市2006—2019年EWP进行测算。限于篇幅只呈现城市EWP均值及增长率排名前5位和后5位城市(表3)。分析发现：2006—2019年，城市EWP整体偏低，其均值为0.803，说明黄河流域城市经济发展与生态环境协调程度较差，尚存在19.7%的提升空间。从均值来看，排名前5位城市依次是定西市、陇南市、天水市、庆阳市和榆林市；排名后5位的城市依次是

表3 2006—2019年黄河流域城市EWP

Tab. 3 Urban EWP of Yellow River Basin during 2006—2019

城市	2006年	2008年	2010年	2012年	2014年	2016年	2019年	均值	增长率/%
定西	6.682	2.168	3.357	4.457	1.227	1.050	3.733	3.031	-4.38
陇南	6.275	4.835	1.902	1.203	0.811	1.044	2.503	2.208	-6.82
天水	1.607	0.763	1.129	3.340	1.081	2.388	1.166	1.367	-2.44
庆阳	1.089	1.589	2.147	1.284	1.020	1.025	1.181	1.268	0.63
榆林	1.450	1.441	1.052	1.197	1.021	2.009	1.701	1.250	1.23
铜川	1.065	0.376	0.466	0.399	0.475	0.331	0.312	0.451	-9.02
阳泉	0.353	0.360	0.308	0.409	0.430	0.319	0.645	0.382	4.76
大同	0.387	0.399	0.357	0.312	0.312	0.309	0.378	0.348	-0.17
兰州	0.381	0.343	0.317	0.279	0.353	0.364	0.469	0.342	1.62
西宁	0.346	0.348	0.340	0.285	0.276	0.468	0.313	0.321	-0.76
宝鸡	0.545	0.481	0.462	0.628	5.022	0.563	2.612	1.050	12.81
济南	0.449	1.006	0.443	0.581	0.727	1.160	1.723	0.809	10.89
太原	0.351	0.483	0.503	0.351	0.324	0.487	1.250	0.540	10.25
西安	0.299	0.298	0.301	0.412	0.375	1.001	1.019	0.563	9.88
乌海	0.391	0.320	0.390	0.524	1.014	0.811	1.293	0.650	9.64
陇南	6.275	4.835	1.902	1.203	0.811	1.044	2.503	2.208	-6.82
石嘴山	1.122	1.025	1.230	0.375	1.024	1.016	0.388	0.935	-7.84
运城	1.605	0.725	0.638	0.532	0.524	0.519	0.535	0.675	-8.11
固原	3.167	1.018	1.220	0.698	0.657	1.004	1.025	1.128	-8.31
铜川	1.065	0.376	0.466	0.399	0.475	0.331	0.312	0.451	-9.02
流域均值	0.955	0.806	0.728	0.813	0.692	0.762	1.076	0.803	2.40

铜川市、阳泉市、大同市、兰州市和西宁市。结合地理区位可以发现，EWP均值较高及较低城市均多位于黄河上游及中游。从年均增长率来看，增长速度最快的5个城市分别是宝鸡市、济南市、太原市、西安市和乌海市，其中宝鸡市EWP年均增速高达12.81%。说明2006—2019年，这些城市EWP得到显著改善。相反，增速最低的5个城市依次为陇南市、石嘴山市、运城市、固原市和铜川市，其年均增速均小于0，铜川市年均增速低至-9.02%。

表4 黄河流域城市EWP全局Moran's *I*指数

Tab. 4 Global Moran's *I* of urban EWP of Yellow River Basin

年份	Moran's *I*值	*P*值	年份	Moran's *I*值	*P*值
2006	0.184	0.001	2013	0.083	0.029
2007	0.191	0.001	2014	0.042	0.160
2008	0.129	0.008	2015	0.167	0.011
2009	0.155	0.018	2016	0.173	0.006
2010	0.134	0.018	2017	0.180	0.001
2011	0.075	0.185	2018	0.176	0.005
2012	0.127	0.020	2019	0.162	0.013

3.2 城市EWP空间相关性分析

黄河流域城市EWP整体水平较低，且地区差异明显。为深入刻画黄河流域城市EWP的空间相关性，本文基于ArcGIS 10.8软件进行全局自相关分析（表4）。除2011年和2014年外，其余年份Moran's *I*指数均通过0.05水平显著性检验，这表明黄河流域城市EWP均呈现明显空间正相关，空间效应显著，即一个城市EWP会受到周边城市EWP的影响。

为识别城市EWP典型集聚类型，选取2006年和2019年进行局部空间自相关分析（图2），结果均通过0.05水平的显著性检验。这表明黄河流域城市EWP存在显著局部集聚特征。分析发现，处于空间正相关的城市由2006年18个下降到2019年4个。从集聚类型来看，低-低型城市由2006年15个减少为2019年2个。高-高型城市数量由2006年3个下降到2019年的2个，这表明黄河流域城市EWP局部集聚特征明显减弱。

3.3 城市EWP空间差异驱动因素分析

3.3.1 传统回归模型估计结果 为探究各因素对黄河流域城市EWP的全局影响，首先基于普通最小二

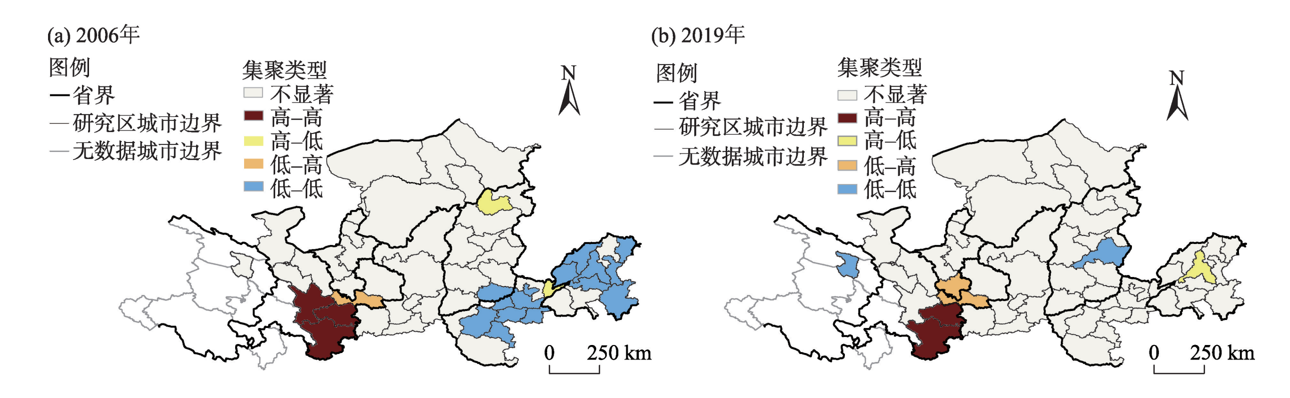


图2 黄河流域城市生态福利绩效(EWP)的LISA集聚图

Fig. 2 LISA clustering map of urban EWP of Yellow River Basin

表5 OLS模型估计结果

Tab. 5 Estimated results of OLS model

变量	系数	标准差	*t*值	*P*值	VIF
截距	0.803***	0.020	39.76	0.000	–
X_1	0.086***	0.029	2.96	0.003	2.05
X_2	0.004	0.037	0.10	0.922	3.27
X_3	−0.086***	0.033	−2.60	0.009	2.70
X_4	0.825***	0.026	9.58	0.000	1.66
X_5	−0.047**	0.025	−1.91	0.057	1.49
X_6	0.030	0.024	1.37	0.170	1.18
X_7	−0.134***	0.022	−4.63	0.007	2.06
X_8	−0.081***	0.029	2.71	0.000	2.17

注:VIF为方差膨胀因子;***、**和*分别表示在0.01、0.05、0.1水平上显著。下同。

表6 OLS模型参数

Tab. 6 Parameters of OLS model

模型参数	数值
R^2	0.181
校正 R^2	0.173
联合*F*统计量(*P*值)	22.643***
联合Chi-square统计量(χ^2)	107.288***
Koenker(BP)统计量(*P*值)	66.839***
Jarque-Bera检验	270.492***
AICc	1456.910

注:OLS为普通最小二乘法;R^2为模型拟合度;AICc为赤池信息量准则。下同。

乘法(OLS)估计各因素的显著性水平及其他特性[38]。由表5可见,各因素的方差膨胀因子(VIF)均小于7.5,表明因素选取合理,不存在多重共线性问题。

由表5可知,在5%及以下显著性水平条件下,共有6个因子对EWP有重要影响。其重要程度由大到小依次为教育发展水平(X_4)、金融发展水平(X_7)、降水量(X_1)、人口密度(X_3)、产业结构水平(X_8)、经济强度(X_5)。其中,金融发展水平(X_7)、人口密度(X_3)、产业结构水平(X_8)、经济强度(X_5)4个因素系数为负;降水量(X_1)、教育发展水平(X_4)系数为正。Koenker(BP)统计量非常显著,说明建模方程不稳定,影响因素可能存在空间异质性问题(表6)。换言之,OLS模型仅考虑回归系数的全局特征,不能有效解决空间位置和时间效应引起的城市EWP变化问题,因此有必要引入空间计量模型,以更好探究其局部系数特征。考虑模型效度,选取降水量(X_1)、人口密度(X_3)、教育发展水平(X_4)、经济强度(X_5)、金融发展水平(X_7)及产业结构水平(X_8)6个因子进入GTWR模型中。

3.3.2 GTWR模型估计结果 基于上文分析,采用GTWR模型,以各城市的投影坐标确定空间位置,以固定高斯函数为空间权属函数(bi-square),以AICc法确定最优带宽,进行估计。根据已有研究[29-30]观点,AICc越小越好,若GTWR拟合结果中AICc与OLS拟合结果中AICc的差值大于3,说明GTWR比OLS拟合结果更理想,应用性更好[35]。对比表6和表7可知,GTWR模型优于OLS模型。

GTWR模型回归结果会得出每一个城市单元的特定系数。从对各因素系数估计值的描述性统计(表8)可知,各因素回归系数差异较大,这说明各因素对城市EWP的影响并非平稳的系数关系,而是受到城市空间位置和时间变化的影响。拟合系数可体现各因素对城市EWP的影响方向和程度。平均值与中位数方向一致,表明此因素在多数空间范围

表7 GTWR模型参数

Tab. 7 Parameters of GTWR model

模型参数	数值
带宽	0.115
残差平方和	150.474
显著水平(Sigma)	0.026
AICc	1161.780
R^2	0.563
校正 R^2	0.550

的影响性质趋同。

3.3.3 城市EWP影响因素分析 为更加直观地刻画各驱动因素对城市EWP的局部效应,本文采用自然断点法,将2006年和2019年的各因子系数进行可视化表达(图3、图4),结合表8回归系数及可视化结果,分析各因素对黄河流域城市EWP的空间异质性影响。

(1) 自然因素对城市EWP的影响。降水量促进城市EWP的提升,其回归系数为0.122。这表明降水量的增加会促进城市EWP的提高。从空间关系来看,降水量对城市EWP的影响程度存在"西高东低"的特征,其中以甘肃、宁夏、青海等省份的城市影响最大。结合图3a、图4a可知,降水回归系数正值区域在2006年主要集中在黄河上中游,而负值区域主要聚集在黄河下游地区。2019年降水量正值区域面积进一步扩大,但依然以上中游地区为主。黄河流域上中游城市均处于干旱、半干旱地区,降水量是影响植被生长的关键因素。因此,降水量对城市EWP的正向促进作用在上中游区域更为显著。

(2) 社会因素对城市EWP的影响。社会因素包含人口密度和教育发展水平。从人口密度来看,其对城市EWP主要为负向影响。2006年人口密度对城市EWP的抑制作用呈现自西向东逐渐递减的趋势(图3b)。负向影响最为显著的区域主要集中在甘肃、宁夏2个省份。2019年人口密度对城市EWP的影响方向出现分化,在流域上游及下游区域人口密度影响方向为正,而在流域中游影响方向为负(图4b)。从教育发展水平来看,其与城市EWP主要呈正相关。2006年教育发展水平影响最显著的区域主要集中在甘肃省南部及陕西省关中地区(图3c);2019年则以黄河中下游地区为主,如郑州市、开封市、南阳市等(图4c)。这可能与中下游地区的城市教育配套体系和制度健全,使得教育经费产出效率提高有关。

(3) 经济因素对城市EWP的影响。经济因素包含经济强度、金融发展水平与产业结构水平。综合来看,经济强度和金融发展水平制约了城市EWP的提升。2006年经济强度制约作用显著的城市包括陇南市、定西市、天水市、兰州市、白银市5个城市,金融发展水平制约作用显著的城市为西宁市、武威市、乌兰察布市及巴彦淖尔市(图3d~e);2019年经济强度制约作用减弱,而金融发展水平的制约作用进一步增强(图4d~e)。与经济强度和金融发展水平相反,产业结构水平对城市EWP具有正向促进作用。这表明产业结构水平越高,城市EWP越高。2006年产业结构水平影响高值区域以西宁市、武威市、三门峡市、南阳市等城市最为凸显(图3f);2019年高值区域以南阳市、平顶山市、洛阳市、郑州市等城市较为显著(图4f)。

4 讨论

(1) 关于黄河流域城市EWP水平的测度。已有研究[17,21]在构建指标体系的过程中,对于生态维度考虑不足。在借鉴已有研究[2,9]基础上,构建了反

表8 GTWR模型回归系数的描述性统计

Tab. 8 Descriptive statistics of the regression coefficient of GTWR model

自变量	平均值	下四分位数	中位数	上四分位数	最小值	最大值
X_1	0.122	0.012	0.064	0.197	−0.459	0.998
X_3	−0.092	−0.129	−0.018	0.039	−2.906	0.676
X_4	0.102	−0.015	0.093	0.218	−0.583	0.740
X_5	−0.078	−0.124	−0.039	0.011	−1.647	0.359
X_7	−0.043	−0.133	−0.082	0.026	−0.368	0.556
X_8	0.023	−0.066	0.017	0.123	−0.495	0.584

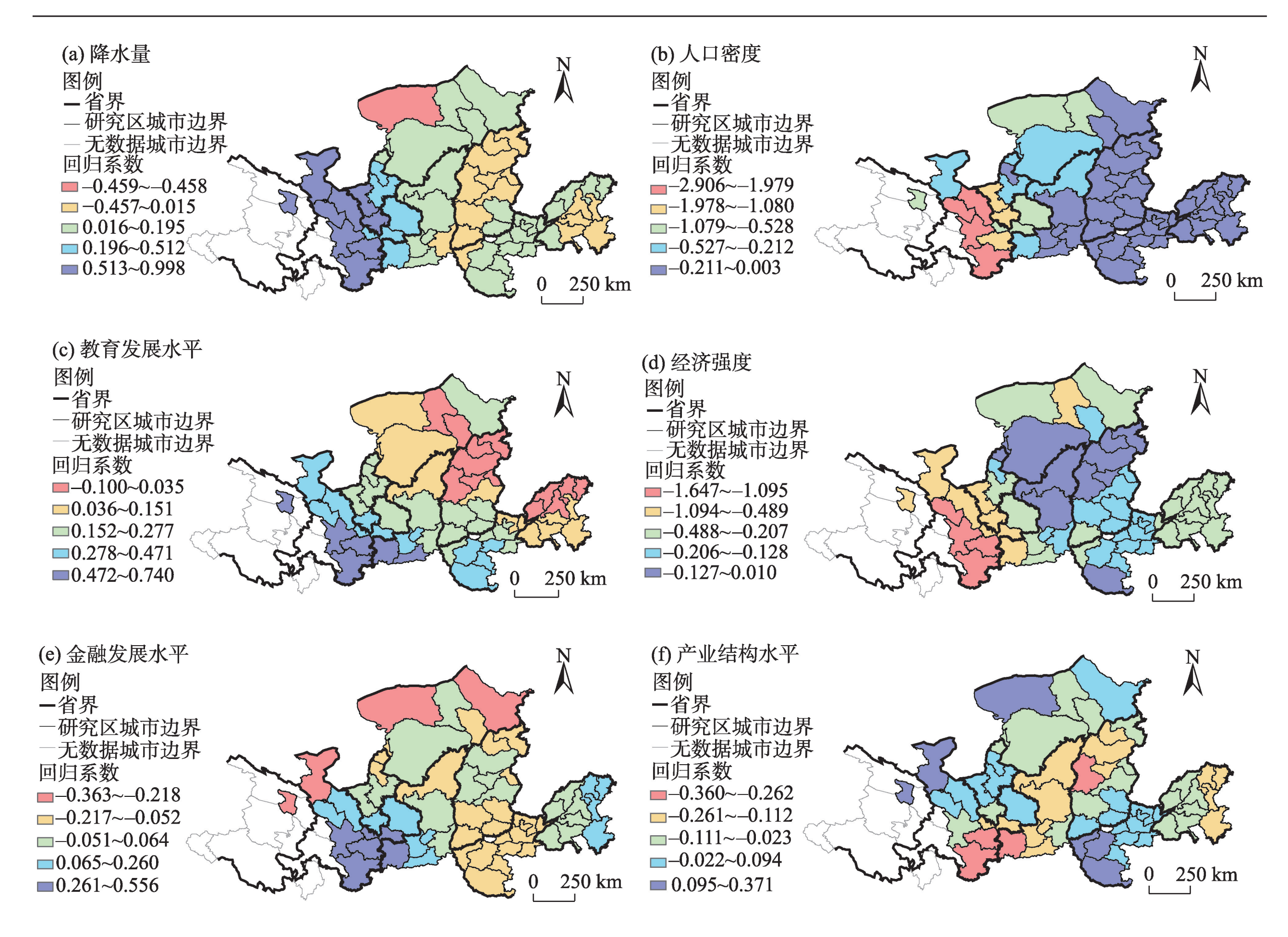


图3 2006年黄河流域城市EWP各影响因素回归系数估计的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of regression coefficients of urban EWP of Yellow River Basin in 2006

映EWP的多目标评价指标体系，如生境质量年均值、$PM_{2.5}$等。在非期望产出中，纳入遥感数据$PM_{2.5}$作为废气污染评价指标，既拓展了非期望产出指标内涵，也尝试了使用遥感数据作为研究城市EWP的数据源。研究发现$PM_{2.5}$对EWP水平影响显著。另外，在产出指标中，增加了代表生态系统服务水平的人均绿地面积指标。虽然生态系统服务与城市生态福祉的融合需进一步加强，但纳入人均绿地面积等指标是一种有益尝试，为科学测度城市EWP水平提供新的研究思路。

（2）关于城市EWP的空间分异。目前对全国[21]、区域[17]、省际[10,22]和城市[14,29]等不同城市空间尺度的研究结果表明，城市EWP的演变在多重空间尺度下存在差异。本研究的不同之处在于聚焦自然禀赋、生态本底、经济发展水平等差异较大的黄河流域，利用空间探索方法剖析黄河流域城市EWP的空间异质性，这与许多已有研究[12,18]不考虑空间相关性，假定城市EWP随机分布不同。空间探索性分析为建立恰当的城市EWP影响因素计量模型提供必要前提，较仅考虑其时间序列变化的因素分解模型[12]、多元回归模型[15]更能全面反映城市EWP演变驱动机制。

（3）关于城市EWP影响因素。当前研究中，对城市EWP影响因素研究主要考虑经济、社会等人文因素，对气温、降水等自然因素考虑较少[20]。而本研究发现，降水量对黄河流域城市EWP呈现显著正向影响，尤其是甘肃、宁夏、青海等省份的城市更为显著。进一步研究发现，不同因素对不同城市影响程度存在明显差异，但经济强度和人口密度对城市EWP具有明显抑制作用，这与已有研究[14,23]相互印证。

当然，研究还存在一定提升空间。(1) 研究尺度问题。由于数据可得性，本文选取地级市尺度测度EWP并探究其影响因素，尚未从县域尺度进行研究。这对有效识别县域尺度EWP的影响机制有一定影响，这将是下一步研究重点考虑的内容。(2) 指



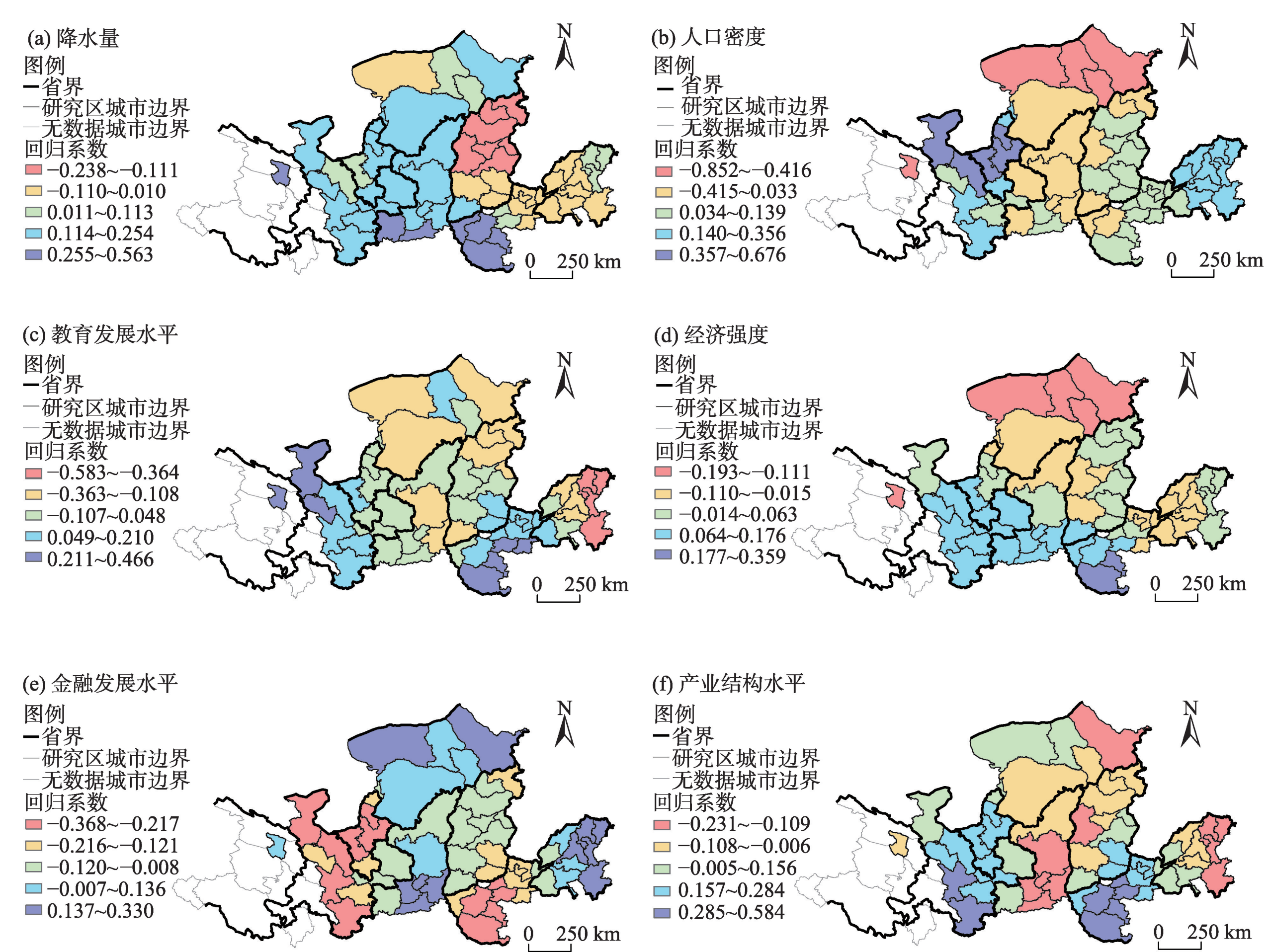


图4 2019年黄河流域城市EWP各影响因素回归系数估计的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of regression coefficients of urban EWP of Yellow River Basin in 2019

标体系问题。由于生态系统为人类福祉的基础,本文借鉴已有研究[1,17]广泛采用的指标体系,虽将产出“人均绿地面积”等纳入指标体系,但如何将生态系统服务更科学地纳入城市EWP测算,也是进一步研究需要解决的问题。

5 结 论

本文构建城市EWP投入与产出指标体系,采用非期望产出的超效率SBM模型,测算黄河流域59个城市2006—2019年的EWP,在分析其时空演化特征的基础上,利用GTWR模型探究自然、社会和经济等因素对城市EWP的影响程度,主要结论如下:

(1) 黄河流域城市EWP总体水平较低。研究期内,其均值为0.803,存在19.7%的提升空间。结合地理区位可以发现,EWP均值较高及较低城市主要位于黄河流域中上游区域。下游城市EWP差距相对较小。28.8%的城市EWP值在研究期内出现下降,说明黄河流域城市经济增长与生态环境需要更好地协调发展。

(2) 黄河流域城市EWP存在显著正向空间自相关和局部自相关,高-高型城市主要分布在人口密度较低的上游地区;低-低型多为黄河中下游经济发展较快、人口相对集中的城市。同时,城市EWP局部空间集聚呈收敛状态,意味着城市化EWP在整体提升的同时,其空间差异在逐步缩小。

(3) 降水量、人口密度、教育发展水平、经济强度、金融发展水平及产业结构水平等因素对城市EWP均有显著影响,且存在明显的空间差异。其中,降水量、教育发展水平和产业结构水平对城市EWP的提升具有显著正向促进作用;人口密度、经济强度及金融发展水平对城市EWP的改善具有明显负向抑制作用。在所有影响因素中,降水量、教育发展水平和人口密度对城市EWP的边际效应较大。

参考文献(References)

[1] 李成宇, 张士强, 张伟, 等. 中国省际生态福利绩效测算及影响因素研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1875-1883. [Li Chengyu, Zhang Shiqiang, Zhang Wei, et al. Measurement and influencing factors of inter-provincial ecological well-being performance in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 39(12): 1875-1883.]

[2] 李成宇, 张士强, 张伟. 中国省际工业生态效率空间分布及影响因素研究[J]. 地理科学, 2018, 38(12): 1970-1978. [Li Chengyu, Zhang Shiqiang, Zhang Wei. Spatial distribution characteristics and influencing factors of China's inter provincial industrial eco-efficiency[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(12): 1970-1978.]

[3] Daly H E. The economics of the steady state[J]. The American Economic Review, American Economic Association, 1974, 64(2): 15-21.

[4] UNDP. Human development report 1990: Concept and measurement of human development[M]. Oxford: Oxford University Press, 1990: 15-18.

[5] Common M. Measuring national economic performance without using prices[J]. Ecological Economics, 2007, 64(1): 92-102.

[6] Hall J, Giovannini E, Morrone A, et al. A framework to measure the progress of societies[J]. Revue D Economie Politique, 2011, 121(1): 93-118.

[7] Tone K, Tsutsui M. Dynamic DEA: A slacks-based measure approach[J]. Omega, 2010, 38(3): 145-156.

[8] Vemuri A W, Costanza R. The role of human, social, built, and natural capital in explaining life satisfaction at the country level: Toward a national well-being index (NWI)[J]. Ecological Economics, 2006, 58(1): 119-133.

[9] 诸大建, 张帅. 生态福利绩效与深化可持续发展的研究[J]. 同济大学学报(社会科学版), 2014, 25(5): 106-115. [Zhu Dajian, Zhang Shuai. Ecological wellbeing performance and further research on sustainable development[J]. Journal of Tongji University (Social Science Edition), 2014, 25(5): 106-115.]

[10] 徐昱东, 亓朋, 童临风. 中国省级地区生态福利绩效水平时空分异格局研究[J]. 区域经济评论, 2017(4): 123-131. [Xu Yudong, Qi Peng, Tong Linfeng. Spatial-temporal differentiation of Chinese provincial ecological well-being performance[J]. Regional Economic Review, 2017(4): 123-131.]

[11] 臧漫丹, 诸大建, 刘国平. 生态福利绩效:概念、内涵及G20实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(5): 118-124. [Zang Mandan, Zhu Dajian, Liu Guoping. Ecological well-being performance: Concept, connotation and empirical of G20[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(5): 118-124.]

[12] 冯吉芳, 袁健红. 中国区域生态福利绩效及其影响因素[J]. 中国科技论坛, 2016(3): 100-105. [Feng Jifang, Yuan Jianhong. On Chinese regional ecological well-being performance and its influence factors[J]. Forum on Science and Technology in China, 2016 (3): 100-105.]

[13] Dietz T, Rosa E A, York R. Environmentally efficient well-being: Is there a Kuznets curve?[J]. Applied Geography, 2012, 32(1): 21-28.

[14] 龙亮军. 基于两阶段Super-NSBM模型的城市生态福利绩效评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7): 1-10. [Long Liangjun. Evaluation of urban ecological well-being performance of Chinese major cities based on two-stage super-efficiency network SBM model[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(7): 1-10.]

[15] 龙亮军, 王霞, 郭兵. 基于改进DEA模型的城市生态福利绩效评价研究——以我国35个大中城市为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 595-605. [Long Liangjun, Wang Xia, Guo Bing. Evaluation of urban ecological well-being performance based on revised DEA model: A case study of 35 major cities in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 595-605.]

[16] Jorgenson A K, Dietz T. Economic growth does not reduce the ecological intensity of human well-being[J]. Sustainability Science, 2015, 10(1): 149-156.

[17] 方时姣, 肖权. 中国区域生态福利绩效水平及其空间效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(3): 1-10. [Fang Shijiao, Xiao Quan. Research on regional ecological well-being performance and spatial effect in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(3): 1-10.]

[18] 龙亮军, 王霞. 上海市生态福利绩效评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(2): 84-92. [Long Liangjun, Wang Xia. A study on Shanghai's ecological well-being performance[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(2): 84-92.]

[19] Feng Y J, Zhong S Y, Li Q Y, et al. Ecological well-being performance growth in China (1994—2014): From perspectives of industrial structure green adjustment and green total factor productivity [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117556, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.07.031.

[20] Bian J, Ren H, Liu P. Evaluation of urban ecological well-being performance in China: A case study of 30 provincial capital cities [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 120109, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120109.

[21] 肖黎明, 吉荟茹. 绿色技术创新视域下中国生态福利绩效的时空演变及影响因素——基于省域尺度的数据检验[J]. 科技管理研究, 2018, 38(17): 243-251. [Xiao Liming, Ji Huiru. Spatial structure change and influencing factors of ecological well-being performance from the perspective of green technological innovation in China: Data analysis based on provincial panel data[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(17): 243-251.]

[22] 杜慧彬, 黄立军, 张辰, 等. 中国省级生态福利绩效区域差异性分解和收敛性研究[J]. 生态经济, 2019, 35(3): 187-193. [Du

Huibin, Huang Lijun, Zhang Chen et al. Research on the regional differences decomposition and convergence mechanism of ecological well-being performance[J]. Ecological Economy, 2019, 35(3): 187-193.]

[23] 陈少炜, 罗林杰, 查欣洁. 黄河流域生态福利绩效测算及影响因素分析[J]. 生态经济, 2021, 37(9): 146-154, 168. [Chen Shaowei, Luo Linjie, Zha Xinjie. Research on the measurement and influencing factors of ecological well-being performance: Evidence from the Yellow River region of China[J]. Ecological Economy, 2021, 37(9): 146-154, 168.]

[24] 陈明华, 岳海珺, 郝云飞, 等. 黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(9): 25-44. [Chen Minghua, Yue Haijun, Hao Yunfei, et al. The spatial disparity, dynamic evolution and driving factors of ecological efficiency in the Yellow River Basin[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2021, 38(9): 25-44.]

[25] 王奕淇, 李国平. 基于SD模型的黄河流域生态环境与社会经济发展可持续性模拟[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 901-911. [Wang Yiqi, Li Guoping. Sustainable simulation of ecological environment and socio-economic development in the Yellow River Basin based on the SD model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 901-911.]

[26] 张凯莉, 冯荣荣, 刘潭, 等. 黄河流域城市化与生态系统服务价值协调性及障碍因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1254-1267. [Zhang Kaili, Feng Rongrong, Liu Tan, et al. Research on the coordination and obstacle factors of urbanization and ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4):1254-1267.]

[27] 任保平, 豆渊博. 黄河流域生态保护和高质量发展研究综述[J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 30-34. [Ren Baoping, Dou Yuanbo. Literature review on ecological environment protection and high quality development of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(10): 30-34.]

[28] Xu D. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128948, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128948.

[29] 马勇, 童昀, 任洁. 多源遥感数据支持下的县域尺度生态效率测算及稳健性检验——以长江中游城市群为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1196-1208. [Ma Yong, Tong Yun, Ren Jie. Calculation and robustness test of county-scale ecological efficiency based on multi-source remote sensing data: Taking the urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1196-1208.]

[30] Bian J, Zhang Y, Shuai C, et al. Have cities effectively improved ecological well-being performance? Empirical analysis of 278 Chinese cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 118913, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118913.

[31] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.

[32] 高志刚, 童思聪. 基于非期望产出的新疆区域生态经济投入效益分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 777-785. [Gao Zhigang, Tong Sicong. Regional eco-economic input efficiency of Xinjiang based on undesirable output[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 777-785.]

[33] 杨晴青, 刘倩, 尹莎, 等. 秦巴山区乡村交通环境脆弱性及影响因素——以陕西省洛南县为例[J]. 地理学报, 2019, 74(6): 1236-1251. [Yang Qingqing, Liu Qian, Yin Sha. Vulnerability and influencing factors of rural transportation environment in Qinling-Daba mountainous areas: A case study of Luonan County in Shaanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(6): 1236-1251.]

[34] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted regression-modelling spatial non-stationarity[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1998, 47(3): 431-443.

[35] 刘卫东, 刘红光, 范晓梅, 等. 地区间贸易流量的产业—空间模型构建与应用[J]. 地理学报, 2012, 67(2): 147-156. [Liu Weidong, Liu Hongguang, Fan Xiaomei, et al. Sector-specific spatial statistic model for estimating inter-regional trade flows: A case study of agricultural, chemical and electronic sectors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(2): 147-156.]

[36] 胡宇娜, 梅林, 魏建国. 基于GWR模型的中国区域旅行社业效率空间分异及动力机制分析[J]. 地理科学, 2018, 38(1): 107-113. [Hu Yuna, Mei Lin, Wei Jianguo. Spatial differentiation and dynamic mechanism of regional travel agency efficiency in China based on GWR model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(1): 107-113.]

[37] 李恩康, 陆玉麒, 陈娱. 中国外贸货物出口的地理格局演化及影响因素分析——基于货物出口距离和GTWR模型[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2624-2638. [Li Enkang, Lu Yuqi, Chen Yu. Geographic pattern evolution of China's merchandise export and its influencing factors: Based on the analysis of merchandise export distance and the GTWR model[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2624-2638.]

[38] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1714-1727. [Geng Tianwei, Chen Hai, Zhang Hang, et al. Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi Province based on GWR[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(7): 1714-1727.]

Measurement and influencing factors of ecological well-being performance of cities in Yellow River Basin

DONG Jiefang[1], ZHANG Kaili[2], QU Xueshu[1], RUAN Zheng[3]

(1. Yellow River Cultural and Ecological Research Institute, Department of Cultural and Tourism, Yuncheng University, Yuncheng 044000, Shanxi, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Geological Science and Technology Center, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: The improvement of ecological well-being performance (EWP) is an inevitable choice for the construction of urban ecological civilization and is of great significance to the sustainable development. This paper established the evaluation index system of EWP from the perspective of ecological well-being. Based on the panel data of 59 prefecture-level cities in the Yellow River Basin of China from 2006 to 2019, this article used the undesired output SBM model to measure the EWP of 59 prefecture-level cities. The spatial autocorrelation method and a geographically and temporally weighted regression model were then used to analyze spatial distribution characteristics and influencing factors of interurban EWP in the Yellow River Basin. the results showed the following: (1) The overall EWP level of prefecture-level cities in the Yellow River Basin is relatively low, with 19.7% room for improvement. (2) A significant positive spatial autocorrelation is observed in EWP in the Yellow River Basin. The "hot spot" high-high cities are mainly distributed in the upstream areas with low population density, and the "cold spots" low-low cities are mostly cities in the middle and lower reaches of the Yellow River Basin with rapid economic development and relatively concentrated population. (3) Precipitation, educational development level, and industrial structure level are the positive key factors affecting EWP, while population density, economic intensity, and financial development level contribute to negative effects. Among all the influencing factors, precipitation, educational development level, and population density have the largest marginal effect on urban EWP. The research results make up for the deficiency of the "time-space" non-stationarity analysis of EWP impact factors, and can provide reference for the relevant departments to formulate EWP policies in cities.

Key words: ecological well-being performance; SBM model; remote sensing data; GTWR model; Yellow River Basin